

## 太湖流域典型滨湖河网水动力与水质时空异质性<sup>\*</sup>

夏玉宝<sup>1,2</sup>, 王 华<sup>1,2\*\*</sup>, 何新辰<sup>1,2</sup>, 袁伟皓<sup>1,2</sup>, 曾一川<sup>1,2</sup>, 闫怀宇<sup>1,2</sup>, 张晓兰<sup>1,2</sup>, 涂予新<sup>1,2</sup>

(1:河海大学环境学院,南京 210098)

(2:河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,南京 210098)

**摘要:** 基于中国太湖梅梁湾东部的无锡市滨湖区河网 29 个监测点在丰水期、平水期和枯水期的流速和水质监测数据, 将河网分为梁溪河、曹王泾、骂蠡港、城市河网南区以及城市河网北区 5 个区域, 对流速和典型水质指标的时空异质性进行分析, 结合主成分分析和相关性分析, 得到各区域水动力与水质现状及其成因。结果显示: 梁溪河和曹王泾的水质条件和水动力条件较好, 多数水质因子与流速表现出了强相关性; 骂蠡港的水质和流速区域变化明显, 表现弱相关性; 城市河网北区和南区的流速较缓, 河道污染负荷较大, 流速与水质因子之间的相关性较低。通过在滨湖河网开展流速和水质的野外监测, 分析流速对于河网水环境的实际效果, 验证不同水质指标与流速之间的响应关系, 为滨湖河网区水质保护和科学的水污染防治技术提供基础支撑。

**关键词:** 河网; 水动力; 流速; 营养盐; 时空异质性; 太湖; 梅梁湾

## Spatiotemporal heterogeneity of hydrodynamic forces and water quality in typical lakeside river networks in Taihu Basin<sup>\*</sup>

Xia Yubao<sup>1,2</sup>, Wang Hua<sup>1,2\*\*</sup>, He Xinchen<sup>1,2</sup>, Yuan Weihao<sup>1,2</sup>, Zeng Yichuan<sup>1,2</sup>, Yan Huaiyu<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaolan<sup>1,2</sup> & Tu Yuxin<sup>1,2</sup>

(1: College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

**Abstract:** Based on the flow velocity and water quality monitoring data in three periods: flood season, dry season and normal season from 29 river network monitoring stations in Wuxi Binhu region, which is located in eastern part of Meiliang Bay, Lake Taihu in China, the river network can be divided into five regions. After analyzing the spatial and temporal heterogeneity of flow velocity and the typical water quality indexes and combining the principal component and correlation analysis, the current situation and causes of different regional hydrodynamic and water quality can be understood. The results show that the water quality and hydrodynamic conditions in Liangxi River and Caowangjing River are good, and most of the water quality factors show strong correlation with the flow rate. The regional variation of water quality and flow velocity in Mali Port is obvious, showing weak correlation. In the north and south of the urban river network, the flow rate is slow, the river pollution load is heavy, and the correlation between the flow rate and water quality factors is low. Through the field monitoring of flow velocity and water quality in the Binhu River network, the actual effects of flow velocity on the water environment of the river network can be analyzed, and the response relationship between different water quality indexes and flow velocity have been verified, which provides basic support for the water quality protection and scientific water pollution treatment technology in the Binhu River network area. Thus, it is of great significance to improve the water ecological environment.

**Keywords:** River network; hydrodynamic; velocity; nutrient; spatiotemporal heterogeneity; Lake Taihu; Meiliang Bay

\* 2020-05-12 收稿; 2020-10-31 收修改稿。

国家自然科学基金项目(51779075)和中央高校基本科研业务费项目(2017ZX07203002-01)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: wanghua543543@163.com.

近年来,水体富营养化是全球专家学者研究的水环境热点问题之一,除了营养盐的大量输入外,水体自身的水动力条件会通过影响营养盐在水体中的分布和迁移转化,间接影响富营养化进程,因而影响水体富营养化的主要自然因素就是水动力条件。断面平均流速(简称流速)则是表征水动力条件最基本、最直观的因子<sup>[1]</sup>。目前已经有许多专家学者对流速及其水环境因子的相关性做了大量的工作,如 Marshall 等<sup>[2-3]</sup>发现流速对于水体中营养盐状况有一定的影响,Depinto 等<sup>[4-6]</sup>的研究结果表明水体中悬浮颗粒物的沉积浓度及质量与流速关系密切,李一平等<sup>[7-9]</sup>则发现底泥总氮和总磷的释放率与流速存在指数关系,Koopmans 等<sup>[10-13]</sup>研究发现水动力条件对于大气复氧过程也有一定的影响,张丽萍等<sup>[14-15]</sup>发现底泥氮磷释放速率变大的主要原因之一就是水动力扰动强度的增加。而对于河流而言,产生水动力扰动的主要因素就是流速的变化<sup>[16]</sup>。

无锡滨湖河网由京杭运河、梁溪河等主要河道以及城市内河道连通构成,是无锡市滨湖区不可或缺的组成部分。一方面,研究区域河网纵横交错,地域条件复杂。另一方面,城市的高速发展和人们生活水平的提高,导致大量的工业、生活污水输入至河道中,进而加剧了城市水系水质恶化和生态环境退化<sup>[17]</sup>,导致河网内河道大面积黑臭。与平原河网不同,滨湖河网的水质条件直接受到湖泊水体条件的影响,尤其是近年来,滨湖河网城市主要通过从湖泊调水来增加水体流动性,改善河网的水动力条件,进而提高水体自净能力,在这个过程中,大量的湖水被引入河网,进一步加大了湖泊对于河网水质条件的影响。因此,通过在滨湖河网开展流速和水质的野外监测,分析流速对于河网水环境的实际效果,验证不同水质指标与流速之间的响应关系,为滨湖河网区水质保护和科学的水污染治理技术提供基础支撑,对改善水生态环境意义重大<sup>[18]</sup>。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域特征

滨湖河网位于太湖梅梁湾东部,无锡市滨湖区蠡湖新城片区内。该河网主要河道由京杭运河、梁溪河、曹王泾、骂蠡港组成,河网地区水动力条件较差,洪枯两季平均流速 20.4 cm/s<sup>[19]</sup>,同时,河网内建设有大量水闸,防止蓝藻入侵的同时,也导致了除主要河道外,支流等小河道流速小于 10 cm/s,或静止不动。由于蠡湖新城片区人口密集,人类活动频繁,存在生活污水直排现象,相当一部分污染物经城市地表径流进入河流,导致河流水体中 N、P 营养盐浓度较高。2017 年滨湖河网综合营养状态值数为 57.3<sup>[20]</sup>,处于轻度富营养化状态。根据河网各河道断面的监测数据结果,以Ⅳ类水为标准,多项水质指标超标严重,总氮超标率甚至接近 100%。滨湖河网的上游水源为太湖,目前太湖( $30^{\circ}55'42''\sim31^{\circ}33'50''N, 119^{\circ}53'45''\sim120^{\circ}36'15''E$ )在我国五大主要淡水湖中位列第三,是典型的大型侵蚀性浅水湖泊,位于我国长江三角洲南部,全湖水面面积 2338 km<sup>2</sup>。太湖水体总体处于富营养化状态,氮、磷浓度较高,尤其夏季时期(7—9 月)蓝藻水华富集现象比较严重。

在滨湖河网包括梁溪河、骂蠡港、曹王泾等主要河道以及城市内部河道共布设 29 个监测点(图 1),1~6 监测点位于梁溪河内,8~11 监测点位于骂蠡港内,12~16 监测点位于曹王泾内,17~22 监测点位于城市河网北区中,23~30 监测点位于城市河网南区中。

### 1.2 野外监测

8 月、11 月分别为滨湖河网地区的丰水期与枯水期,为了体现滨湖河网营养盐情况在不同水文条件下的特征,于 2018 年 8 月、11 月和 2019 年 3 月、10 月 4 次在滨湖河网进行水质取样监测工作。在水文监测方面,使用 YH-S7 流速仪测定河流的流速。水质监测方面,现场取水样并封装完毕,送入实验室进行测定,测定指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、溶解氧(DO)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)、亚硝态氮(NO<sub>2</sub>-N)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、悬浮物(SS)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、磷酸根(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)9 项水质指标。同时,考虑到重金属也是城市河道的主要污染物之一<sup>[21]</sup>,对水体中 Cr、Ni、Cu、Zn、As 浓度进行同步检测。

水体中 TN 浓度采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法<sup>[22]</sup>测定,其原理是过硫酸钾在高温的碱性介质中会充分分解,同时产生具有强氧化性的硫酸根游离基将水中的含氮化合物氧化成硝酸盐<sup>[23-24]</sup>,最后利用紫外分光光度法测定硝酸盐在波长 220 和 275 nm 处的吸光度,进而计算硝酸盐浓度,推算水中 TN 浓度。

水体中 TP 浓度采用过硫酸钾氧化—钼锑抗分光光度法<sup>[25]</sup>测定,该方法是用过硫酸钾在中性的条件下将水样消解,同时将水中的含磷化合物全部氧化为正磷酸盐<sup>[26]</sup>。然后在酸性的条件下,正磷酸盐会和钼酸

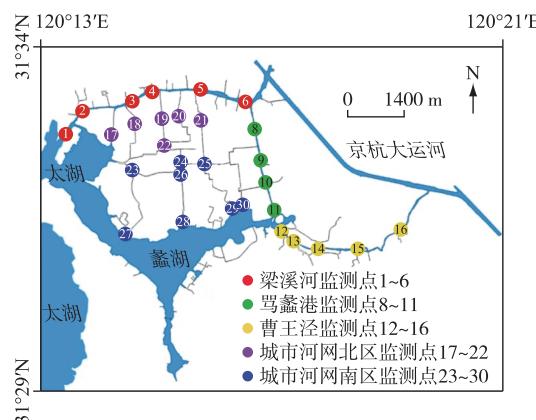


图 1 滨湖河网区域图

Fig.1 Area diagram of Binhu river network

铵、酒石酸锑氧钾反应,生成会被抗坏血酸还原的磷钼杂多酸。最后用 30 mm 比色皿,在波长 700 nm 处,以水做参比,测定吸光度,进而推算出水中 TP 浓度。 $\text{NO}_3^-$ -N 浓度的测定采用纳氏试剂分光光度法<sup>[27]</sup>,同时采用酚二磺酸分光光度法<sup>[28]</sup>来测定水样中的  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度,其余水质指标和重金属浓度的测定方法均采用标准方法<sup>[29]</sup>。

### 1.3 数学分析方法

本研究首先通过对滨湖河网 5 个区域,总计 29 个监测点位,为期 4 个月跟踪监测的流速进行分析,得到滨湖河网水动力条件的时空异质性分析结果;再选取 TN、TP、 $\text{NH}_3$ -N 和 COD<sub>Mn</sub> 4 项指标进行分析,得到滨湖河网水质时空异质性结果,但样品检测结果存在一定量的异常值(有异常过大及过小的现象出现),为保证较好的代表性,异常数据不予以呈现;然后用 R 语言对各区域的流速与 14 个水质指标之间进行相关性分析,同时对滨湖河网各个区域进行主成分分析(PCA),主成分分析可以在不损失信息或者少损失信息的情况下,对协方差矩阵进行特征分解,将多个水质变量因子简化成 TN、TP 等少数几个能直接概括大量水质指标数据的主要影响因子<sup>[30]</sup>。最后通过流速和典型水质指标的时空异质性分析结果,结合相关性分析、主成分分析,得到滨湖河网各区域水动力与水质现状及其成因分析。本文采用的主要数据分析工具为 R 语言。

## 2 结果与分析

### 2.1 滨湖河网水动力时空异质性分析

在 4 个月连续监测中,滨湖河网 29 个监测点位流速如图 2 所示,整体平均值为 5.22 cm/s,波动范围为 0~52.6 cm/s,标准差为 0.116。其中梁溪河、骂蠡港、曹王泾、城市河网北区和城市河网南区的平均流速分别为 23.0、2.47、4.41、0.956 和 0.133 cm/s,值得一提的是,梁溪河的流速远大于其余 4 个区域,属于强水动力区域,这是因为梅梁湖、蠡湖和梁溪河交界处建设有梅梁湖泵站和大渲河泵站,用于对梁溪河及其水系进行不间断调水补偿,导致梁溪河的水动力条件,尤其是流速条件优于其他区域;骂蠡港区域较为特殊,该区域与梁溪河相连通,接受来自城市河网北区和南区的来水,同时骂蠡港的入湖口与曹王泾的入湖口基本处于同一位置,故骂蠡港区域的北端流速为强流区,但中南部又为弱流区,综合来看水动力条件归属于弱流区;曹王泾也是连通蠡湖和京杭运河的河流,但由于河道整体较窄,且区域内存在闸门,故水动力情况不如梁溪河区域,也属于弱流区;城市河网北区和城市河网南区的水动力条件最差,属于静水区。同时在 4 个月的跟踪监测中,多次检测到城市河网河道流速小于 1 cm/s,或静止不动(图 2)。这是因为河网内建设有大量水闸,为了防止蓝藻入侵,水闸长期处于关闭状态,河道流速较低,部分位置流速近似为 0,导致城市河网水动力条件较差。时间尺度上,整个河网丰水期流速平均值为 28.9 cm/s,平水期为 4.73 cm/s,枯水期为 0.879 cm/s。平水期和丰水期的流速分别约是枯水期的 5.38 和 32.88 倍,变化显著。总体而言,时间尺度上,整个滨湖河

网的流速全年变化明显,丰水期的流速远大于枯水期,空间尺度上,从外围河流到城市河网,流速整体呈下降趋势.

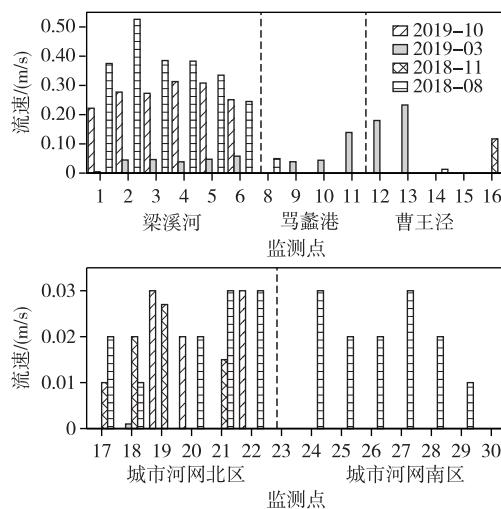


图 2 流速在丰水期(2018-08)、枯水期(2018-11)和平水期(2019-03 和 2019-10)的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of velocity in the wet season (2018-08), dry season (2018-11) and normal season (2019-03 and 2019-10)

## 2.2 滨湖河网典型水质指标时空异质性分析

为期 4 个月的监测中,研究团队监测了其中具有代表性的 3 个月的滨湖河网的高锰酸盐指数平均值为 5.64 mg/L,丰水期、枯水期和平水期平均值分别为 6.15、5.65、4.67 mg/L,全年变化幅度较小,总体表现平稳(图 3). 时间上,梁溪河和曹王泾的高锰酸盐指数从丰水季至枯水季,再到平水季,呈现先上升后下降的趋势,而骂蠡港和城市河网北区的高锰酸盐指数则基本上是从丰水季至平水期一直呈现下降趋势,只有城市河网南区的高锰酸盐指数呈现先下降后上升的趋势. 值得一提的是,除城市河网南区外,其余区域高锰酸盐指数全年的平均值属于地表水 III 类水标准. 空间上,由于河流生态系统的自净功能,梁溪河从西至东高锰酸盐指数值较为平稳,骂蠡港从北至南高锰酸盐指数呈下降趋势,曹王泾从西至东高锰酸盐指数同样呈下降趋势. 而城市内河流大部分为非自然生态系统,自净能力较弱,受区域排污状况的影响,城市河网北区与南区各点位的高锰酸盐指数变化无一定规律,但是梁溪河在丰水期的极值差为 1.95 mg/L,骂蠡港、城市河网北区、城市河网南区和曹王泾分别为 6.33、6.83、8.64、2.61 mg/L. 因此,在丰水期城市河网南区高锰酸盐指数变化幅度最大,城市河网北区和骂蠡港次之,最后是曹王泾和梁溪河.

滨湖河网的 TN 指标在 4 个代表月份变化幅度较小,总体平均值为 3.4 mg/L,远高于地表水 V 类水的标准,水质条件较差. 对比各区域丰水期、枯水期和平水期 TN 浓度可以看出,在时间上,梁溪河、曹王泾、城市河网南区和北区 4 个区域的 TN 浓度从丰水期至枯水期,再到平水期均是先上升后下降(图 3). 这是由于丰水期的水量较大,各河道的水动力条件较好,从而对河道水体中的 TN 产生稀释作用,因此在梁溪河、曹王泾以及城市河网南区、北区 4 个区域中丰水期的 TN 浓度较枯水期小. 而骂蠡港中 TN 浓度从丰水期至枯水期,再到平水期,TN 浓度呈现先下降后上升,丰水期的 TN 浓度比枯水期大,原因可能是滨湖区东部有多条城市内河汇入骂蠡港中,同时滨湖区东部人口密度较大,大部分工业工厂坐落于此,丰水期正值夏季,工厂以及生活排污量比枯水期大得多,因此即使得到一定的水流稀释作用,相对于枯水期,污染物的浓度仍处于高水平状态. 而对于曹王泾的 15 号点位而言,由于在枯水期发生河道局部蓝藻水华现象,水体中藻类密度很高,因此所测水质结果 TN、TP 浓度比丰水期高出 5~10 倍. 空间上,各区域内 TN 浓度变化规律与高锰酸盐指数基本一致,略有不同的是,河网北区 TN 在丰水期及枯水期的极值差分别为 5.52、1.78 mg/L,河网南区为 4.14、6.85 mg/L,由此可得,城市河网北区在丰水期时 TN 浓度变化幅度要比南区大,而城市河网南区则与之相反.

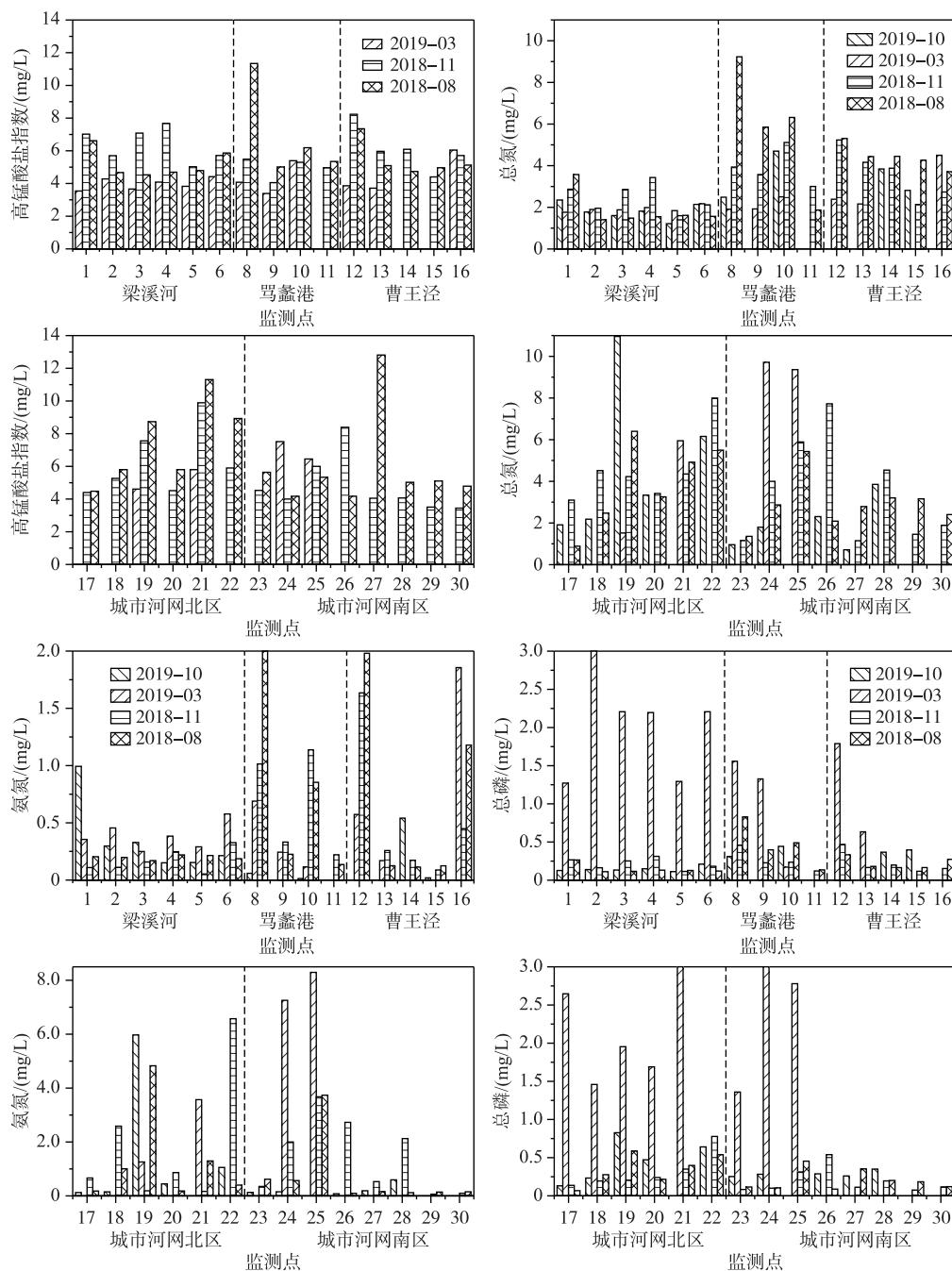


图 3 COD<sub>Mn</sub>、TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 在丰水期(2018-08)、枯水期(2018-11)和  
平水期(2019-03 和 2019-10)的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of COD<sub>Mn</sub>, TN, NH<sub>3</sub>-N and TP in wet season (2018-08),  
dry season (2018-11) and normal season (2019-03 and 2019-10)

与 TN 指标不同, 滨湖河网的 TP 指标在 4 个月的跟踪监测中变化明显, 整体平均值为 0.66 mg/L, 平水

期(1.28 mg/L)远大于丰水期(0.26 mg/L)和枯水期(0.24 mg/L). 在时间上,TP浓度变化规律与TN浓度稍有不同,对比TN浓度的变化规律,可以发现TP浓度从丰水期至枯水期呈下降趋势的区域增加了城市河网北区与南区两个区域,并且2个区域丰水期和枯水期的TP浓度几乎相等. 原因是与N元素不同,P循环属于沉积性循环,会在水体与底泥中稳定地转换,并且城市河道的水流流速较低,水动力条件较差,因此TP浓度在这2个区域相对稳定. 但同时由图3可知,各区域在3月的TP浓度严重超标,这可能是由于3月气温较低,水体内的水生植物和微生物代谢活动强度也随之下降,导致水体自净能力降低,TP等污染物指标上升. 空间上,各区域内TP浓度变化规律与TN浓度基本一致.

滨湖河网的NH<sub>3</sub>-N指标状况良好,全年平均值为0.98 mg/L. 以地表IV类水为标准,丰水期和枯水期NH<sub>3</sub>-N指标不达标的区域仅占到20%,分别是骂蠡港和城市河网北区,平水期则是城市河网南区和北区不达标,其中南区的NH<sub>3</sub>-N指标属于劣V类标准. 时间上,梁溪河和曹王泾的NH<sub>3</sub>-N浓度在丰水期、枯水期和平水期的变化范围小于0.2 mg/L,变化幅度较小;骂蠡港的NH<sub>3</sub>-N指标从丰水期到枯水期,再到来年的平水期,一直处于下降趋势,下降幅度达到1.42 mg/L,而城市河网南区和城市河网北区则恰恰相反,NH<sub>3</sub>-N指标呈现上升趋势,增幅分别为1.52和0.52 mg/L. 空间上,梁溪河的NH<sub>3</sub>-N指标在丰水期、枯水期以及平水期均处于地表水II类标准,水质最好,曹王泾略次之,但在3个时期的指标也都达到了地表水III类标准,城市河网南区和城市河网北区的NH<sub>3</sub>-N指标最高,除去南区在平水季属于劣V类之外,其他的监测值也都达到地表水V类标准,骂蠡港在3个时期的变化较大,丰水期时,NH<sub>3</sub>-N指标达到了地表水V类标准,枯水期则达到了地表水III类标准,平水期更是达到了地表水II类标准.

### 2.3 讨论

梁溪河的流速与水质指标间的相关性分析及主成分因子分析如图4所示,结合流速以及典型水质指标的时空异质性分析,可以看出,梁溪河区域的流速与大部分水质指标都表现出了较强的相关性,并且随着流速增大,水质也会有所改善. 其原因是,对于滨湖河网而言,梁溪河是仅有的一条与城区水系、京杭大运河、蠡湖及太湖相沟通的天然河流,并且在梁溪河水系中,有2个泵站对该水系进行不间断的调水补偿,这导致了梁溪河区域的水动力条件,尤其是流速远优于其他区域,当流速增大时,水体的流动性提高,断面过水流量也随之增加,流速对于水质因子迁移转化的影响效应就会越明显. 结合唐一率<sup>[31]</sup>的研究,可以明显看出调水在一定程度上可以改善水质. 但是,调水在输移过程中也带来大量的悬浮物,采样的数据也证明了这一点,梁溪河的SS浓度为61.97 mg/L,远大于骂蠡港(32.34 mg/L)、曹王泾(20.78 mg/L)、城市河网北区(30.67 mg/L)和城市河网南区(34.62 mg/L),同时,梁溪河的流速从2018年8月的0.37 m/s到2019年3月的0.039 m/s,一直处于下降趋势,而梁溪河SS浓度也从2018年8月的44.83 mg/L下降至2019年3月份的3.97 mg/L,与流速处于同步下降趋势.

对于骂蠡港,研究发现该区域流速与水质因子的变化情况较为复杂,这是由于骂蠡港的地理位置比较特殊,它与梁溪河和曹王泾直接相连,多条城市内河汇入其中,导致整个骂蠡港的流速分布从北至南逐渐下降. 水质条件则受到梁溪河和城市河网、蠡湖的影响,区域北部的水质条件较好,中部较差,但由于无锡市的多数工厂位于骂蠡港附近,使骂蠡港区域南部的水质变化比较复杂,受季节和人为因素的影响较大,主要表现为夏、冬两季水质较差,春、秋两季水质较好,这是由于夏季生产活动频繁,工厂排污和居民生活排污增多,使水体水质下降;冬季的生产活动虽然较夏季有所下降,但冬季水体自净能力也会有所下降,综合而言,冬季的水质较秋季有所下降. 值得一提的是,研究发现,骂蠡港的流速与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度呈显著负相关,即当流速增大时,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N指标值减小,呈改善变化,原因可能是流速提升,水体中溶解氧浓度增加,易于微生物降解营养物质.

与梁溪河相同,曹王泾也是一条沟通蠡湖和京杭运河的河道,但受制于自身河道宽度,并且河道内存在闸门,流速受到一定程度的影响,整体情况属于弱流区. 水质方面,曹王泾的水质条件仅次于梁溪河,水质情况良好. 流速与水质指标响应方面,受到骂蠡港的影响,曹王泾的流速—NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,流速—NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N都为负相关关系,即当流速增大时,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N浓度下降. 但与骂蠡港不同的是,曹王泾的TP指标都与流速呈现正相关关系,其原因可能是流速的变化引起了上覆水中营养物质动态释放量的变化,具体表现为随着流速的增大,水体中TP浓度随之增长,这也与李一平等<sup>[32]</sup>在太湖研究得到的一定范围内,水体营养物质的释放量

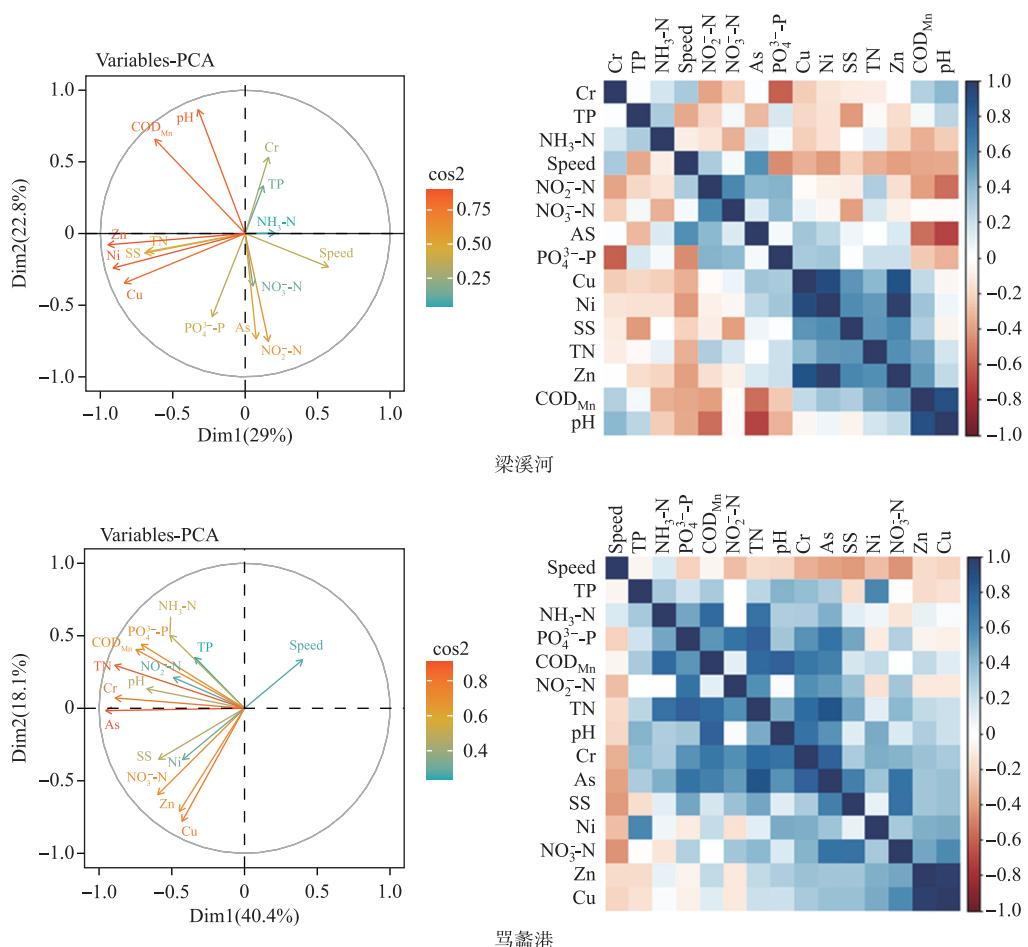


图 4 梁溪河及骂蠡港的主成分分析图及区域相关性热力图

Fig.4 Principal component analysis diagram and regional correlation thermal map of Liangxi River and Mali Port

与流速呈指数增长变化关系的结论相似。

图 5 为城市河网北区的相关性热力图和 PCA 图,结合流速与水质的时空异质性,研究分析发现,该区域的水动力条件较差,流速较缓,全年平均流速低于 1.100 cm/s;水质条件方面,区域内的多数水质指标较差,其中 TN、氨氮指标超标严重,一度达到 V 类水标准的 3~4 倍,但 TP 和 COD<sub>Mn</sub> 指标较好,多数监测断面可以达到 IV 类水标准。这可能是由于城市河网人类活动密集,生活生产排污及垃圾倾倒现象频繁,导致水质条件较差,同时城市河网北区的河流都接受来自梁溪河的补给,所以 TP 和 COD<sub>Mn</sub> 等水质指标受到梁溪河的影响后,在一定程度上有所改善。流速与水质指标相关性方面,城市河网北区的水质指标与流速表现出了复杂不一的关系,其原因是城市内河污染情况严重,水动力条件较差,流速的增大对水质的改善情况不明显,需要进一步跟踪监测。值得一提的是,与梁溪河相同,城市河网北区的 TP 指标也与流速呈显著负相关关系,即随着流速的增大,水体中的 TP 浓度随之减小,水质改善,这与前文中提到城市河网北区的水质在一定程度上受到梁溪河的影响相吻合。

城市河网南区在滨湖河网中属于水动力和水质条件均较差的一个区域,在 4 个月的监测中,多次检测到河网流速小于 10 cm/s,或静止不动,这是由于河网内建设有大量的水闸,用于防止蓝藻入侵,但同时也影

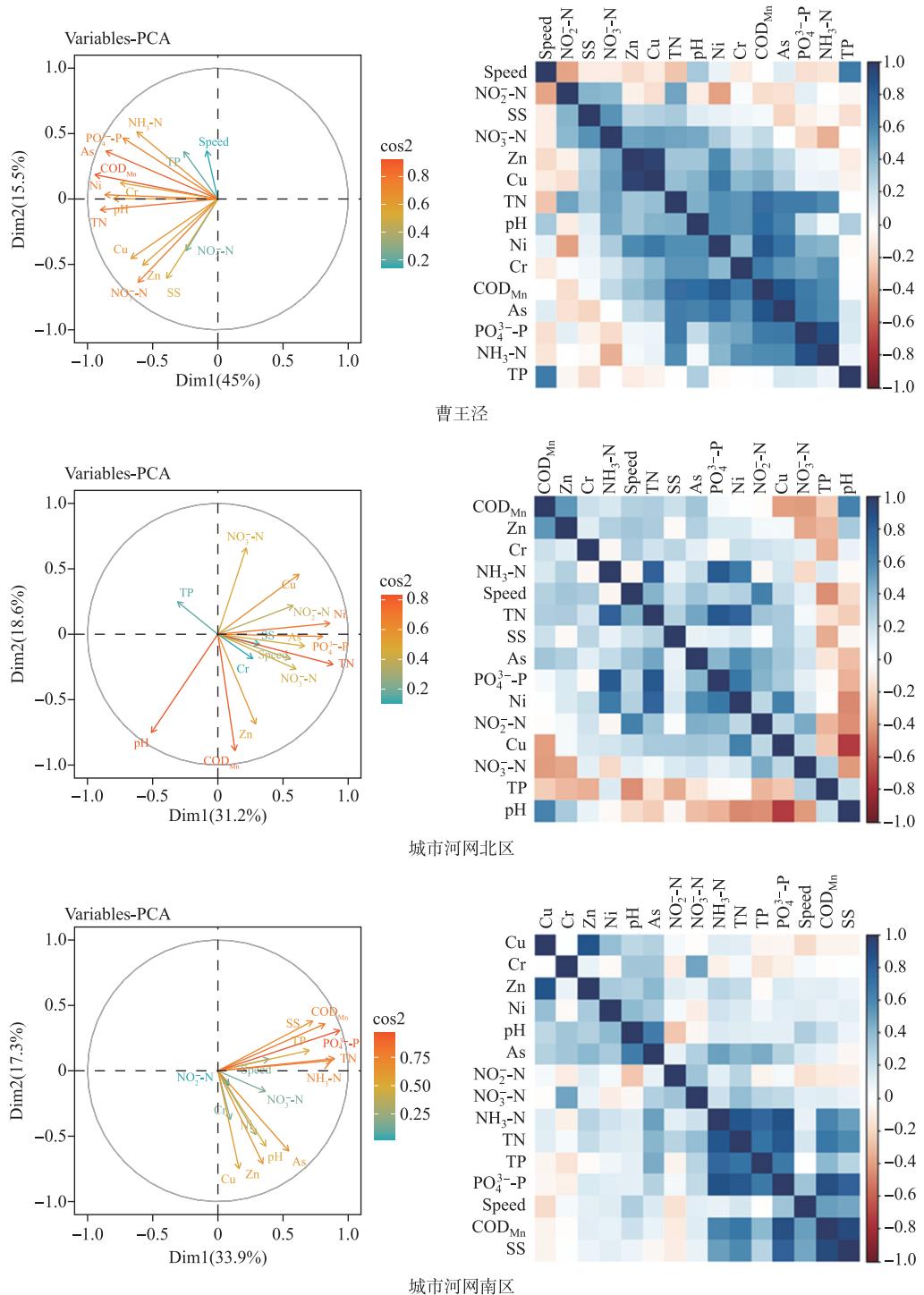


图 5 曹王泾、城市河网北区及城市河网南区的主成分分析图及区域相关性热力图

Fig.5 Principal component analysis diagram and regional correlation thermal map of Caowangjing, north and south urban river network

响的该区域的水动力条件。南区的水质情况与城市河网北区有一定的相似之处,也是 TN、NH<sub>3</sub>-N 指标超标严重,TP 指标表现良好,这可能是由于南区与北区同属城市河网,河道之间相互连通,河道环境也相似,换而言之,南区的大部分河道接受来自北区的来水,但同时监测数据也表明,南区的各项指标均高于北区,即南区河道的污染物负荷大于北区。分析发现,城市河网南区的流速与 NH<sub>3</sub>-N 浓度呈显著正相关,这表明随着流速的增大,NH<sub>3</sub>-N 等水质指标也随之增大了,呈现恶化趋势。原因可能是当流速增强时,水体扰动强度也会随之增加,进而导致底泥中的一些不利因素进入河道,使河道的水质整体表现出恶化的趋势。

综合 5 个区域,影响滨湖河网水动力和水质时空异质性的主要因素包括污染源的分布情况和调水、闸门等水利工程的实施情况以及宽度等河道自身因素。其中河道内闸门开关状态、调水的实施情况是影响河网的水动力时空分布的主要因素,河道自身的宽窄等因素也会对水动力分布有一定影响,但不是主要影响因素;水质因子方面,对于污染物排放严重以及污染负荷较大的区域,水质情况更多的受到河道自身污染物排放程度及浓度的影响,流速的改变难以引起水质的变化,这时影响水质的主要因素则是污染排放情况以及水体自身的污染负荷,这与 Zhang<sup>[33-34]</sup> 等得出的污染严重的水体,水动力与水质之间的响应关系不明确的结论相同。而对于水动力较好的地区,流速与多数水质指标表现出了明显的相关性,并且总体上随着流速的增大,水质呈现改善的趋势,水动力条件成为了影响水质的主要因素,这与崔广柏等<sup>[35-37]</sup> 实验研究得到的对于城区水系而言,水动力的提高在一定程度上能够有效地改善河道的水质状况的结论相似。值得一提的是,滨湖河网作为太湖与京杭大运河的主要连通渠道,航运也是影响河网水动力和水质情况的主要考虑因素之一,经观测,曹王泾、骂蠡港和梁溪河区域的河道上有船只来往,偶有污染排入现象,但将有船行驶和无船行驶时段的水质进行对比后,总体差别较小,基本可以忽略航运对于滨湖河网水质的影响。

滨湖河网主要分布在中国东部湖泊众多、水系密布的地区,除却本文研究的太湖流域滨湖河网,具有代表性的滨湖河网还有位于山东微山县的南四湖流域滨湖河网、江苏淮安市的洪泽湖流域滨湖河网以及江苏省苏州市的阳澄湖流域滨湖河网。本文的研究可在一定程度上对其他平原滨湖河网相关工作给予参考,通过在太湖流域滨湖河网开展流速和水质的野外监测,分析流速对于河网水环境的实际效果,验证不同水质指标与流速之间的响应关系,为滨湖河网区水质保护和科学的水污染治理技术提供基础支撑,同时也对相似滨湖河网地区的水环境治理提供思路,对改善水生态环境有一定实践意义。

### 3 结论

基于无锡市滨湖河网 29 个点位进行丰水期、平水期、枯水期 3 期的流速与水质因子时空异质性分析,结论如下:

1) 滨湖河网 3 期监测流速的整体平均值为 5.22 cm/s,其中丰水期、枯水期、平水期的平均值分别为 28.9、0.879、4.73 cm/s。空间上,流速总体呈现河网北部梁溪河最高,属于强动力区,东南角的曹王泾和东部的骂蠡港次之,属于弱流区,城市河网南区及城市河网北区最差,多次流速监测数据为 0,属于静水区。

2) 滨湖河网典型水质指标的丰水期、平水期、枯水期 3 期监测中,COD<sub>Mn</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N 指标表现良好,除城市河网南区外,其余区域 COD<sub>Mn</sub> 全年的平均值分别属于地表水Ⅲ类水标准,5 个区域的 NH<sub>3</sub>-N 指标均达到了地表 V 类水,其中梁溪河更是达到了Ⅱ类水标准;TN 浓度全年变化幅度平缓,整个滨湖河网水体中的浓度明显高于地表 V 类水标准,超标严重;TP 浓度则与之相反,全年变化明显,平水期(1.28 mg/L)远大于丰水期(0.26 mg/L)和枯水期(0.24 mg/L),除了 3 月外,其余监测月份滨湖河网的 TP 浓度基本能达到 V 类水标准。

3) 对于梁溪河而言,梅梁湾调水对北部河网的水质有一定的改善作用,但同时也为梁溪河带来了大量的悬浮物;骂蠡港在滨湖河网中与多区域连接,水质和流速区域变化明显,相关性较差,但部分水质因子如 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,还是与流速呈负相关关系,即流速增大,水质有所改善。曹王泾的水动力条件受制于自身河道条件,归属于弱流区,但水质条件良好,在滨湖河网中仅次于梁溪河,因此水质因子与流速表现出了较强的相关性;城市河网南区和城市河网北区的水动力条件及水质条件在整个河网中均处于较差水平,而且由于城市内河污染物负荷较大,受人为因素明显,导致这两个区域流速与水质因子之间的相关关系较差,甚至随着流速的增大,水质有恶化的趋势。

4) 考虑滨湖河网的自然因素和社会因素,建议加强对城市河网的治理,这对于东部及东南部的水质改善有重要意义,同时建议对滨湖河网进行一定的河道清淤,从源头上改善水质,并通过一定的工程措施改善河道的水动力条件,提高河道对污染物的稀释、降解和转化能力,进一步改善水体生态环境。

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Liang PY, Wang X, Ma FB. Effect of hydrodynamic conditions on water eutrophication: A review. *J Lake Sci*, 2013, **25**(4): 455-462. DOI: 10.18307/2013.0401. [梁培瑜, 王烜, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 455-462.]
- [ 2 ] Marshall HG, Burchardt L. Phytoplankton composition within the tidal freshwater region of the James River, Virginia. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 1998, **111**(3): 720-730.
- [ 3 ] Ha K, Cho EA, Kim HW et al. *Microcystis* bloom formation in the lower Nakdong River, South Korea: Importance of hydrodynamics and nutrient loading. *Marine and Freshwater Research*, 1999, **50**(1): 89. DOI: 10.1071/mf97039.
- [ 4 ] Depinto JV. Transport and transformation of contaminants near the sediment-water interface. *International Journal of Project Management*, 1994, **25**(5): 517-526
- [ 5 ] Kelderman P, Ang'weya RO, Rozari P et al. Sediment characteristics and wind-induced sediment dynamics in shallow Lake Markermeer, the Netherlands. *Aquatic Sciences*, 2012, **74**(2): 301-313. DOI: 10.1007/s00027-011-0222-7.
- [ 6 ] Gong DY, Pan Y, Huang Y et al. Grain size distribution characteristics of suspended particulate matter as influenced by the apparent pollution in the eutrophic urban landscape water body. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 970-979. DOI: 10.13227/j.hjkx.2016.03.023. [贡丹燕, 潘杨, 黄勇等. 富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征. 环境科学, 2016, **37**(3): 970-979.]
- [ 7 ] Li YP, Pang Y, Lv J et al. On the relation between the release rate of TN, TP from sediment and water velocity. *J Lake Sci*, 2004, **16**(4): 318-324. DOI: 10.18307/2004.0405. [李一平, 逢勇, 吕俊等. 水动力条件下底泥中氮磷释放通量. 湖泊科学, 2004, **16**(4): 318-324.]
- [ 8 ] Peng JP, Pang Y, Li YP et al. The effect of water dynamical condition on phosphorus in lake. *Ecology and Environment*, 2003, **12**(4): 388-392. [彭进平, 逢勇, 李一平等. 水动力条件对湖泊水体磷素质量浓度的影响. 生态环境, 2003, **12**(4): 388-392.]
- [ 9 ] Pang Y, Han T, Li YP et al. Simulation and model computation on dynamic release of nutrition factors of bottom mud in Taihu lake. *Environmental Science*, 2007, **28**(9): 1960-1964. DOI: 10.13227/j.hjkx.2007.09.022. [逢勇, 韩涛, 李一平等. 太湖底泥营养要素动态释放模拟和模型计算. 环境科学, 2007, **28**(9): 1960-1964.]
- [ 10 ] Koopmans DJ, Berg P. Stream oxygen flux and metabolism determined with the open water and aquatic eddy covariance techniques. *Limnology and Oceanography*, 2015, **60**(4): 1344-1355. DOI: 10.1002/lno.10103.
- [ 11 ] Glud RN, Berg P, Hume A et al. Benthic O<sub>2</sub> exchange across hard-bottom substrates quantified by eddy correlation in a sub-Arctic fjord. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, **417**: 1-12. DOI: 10.3354/meps08795.
- [ 12 ] Rheuban JE, Berg P, McGlathery KJ et al. Multiple timescale processes drive ecosystem metabolism in eelgrass (*Zostera marina*) meadows. *Marine Ecology Progress Series*, 2014, **507**: 1-13. DOI: 10.3354/meps10843.
- [ 13 ] Long MH, Berg P, McGlathery KJ et al. Sub-tropical seagrass ecosystem metabolism measured by eddy covariance. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, **529**: 75-90. DOI: 10.3354/meps11314.
- [ 14 ] Zhang LP, Yuan WQ, Zhang XH. Kinetics of pollutants release from sediments. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, **4**(2): 22-26. [张丽萍, 袁文权, 张锡辉. 底泥污染物释放动力学研究. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4**(2): 22-26.]
- [ 15 ] Li DP, Huang Y. Simulation of sedimentary phosphorus release under sediment disturbance. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(5): 993-997. [李大鹏, 黄勇. 底泥扰动状态下内源磷释放过程模拟研究. 环境工程学报, 2010, **4**(5): 993-997.]
- [ 16 ] Zhong XY, Wang CH, Yu CR et al. Characteristics of sediments and nutrient release under different flow velocity. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(8): 2862-2869. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2017.0068. [钟小燕, 王船海, 庾从蓉等. 流速对太湖河道底泥泥沙、营养盐释放规律影响实验研究. 环境科学学报, 2017, **37**(8): 2862-2869.]
- [ 17 ] Song QH, Yang ZF. Thinking of integrated management of urban rivers in China. *Advances in Water Science*, 2002, **13**

- (3) : 377-382. [宋庆辉, 杨志峰. 对我国城市河流综合管理的思考. 水科学进展, 2002, 13(3) : 377-382.]
- [18] Lu ZH, Cai M, Wang YY et al. Discussion on the eco-friendly regulation of water conservancy project in plain river network region: A case of Taihu basin. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2017, 45(5) : 1-3, 12. [陆志华, 蔡梅, 王元元等. 浅谈平原河网地区生态友好型调度——以太湖流域为例. 浙江水利科技, 2017, 45(5) : 1-3, 12.]
- [19] Zeng YC, Wang H, Qu H et al. Spatiotemporal distribution and correlation analysis of chlorophyll a in lakeside river network. *Environmental Engineering*, 2020, 38(9) : 23-30, 153. [曾一川, 王华, 渠昊等. 滨湖河网叶绿素 a 空时分布特征及相关性分析. 环境工程, 2020, 38(9) : 23-30, 153.]
- [20] Wuxi Environmental Status Bulletin 2017. *Wuxi Daily*, 2018-06-05 (3). [http://epaper.wxrb.com/paper/wxrb/html/2018-06/05/content\\_704706.htm](http://epaper.wxrb.com/paper/wxrb/html/2018-06/05/content_704706.htm). [2017 年度无锡市环境状况公报. 无锡日报, 2018-06-05(3).]
- [21] Wang MM. Risk assessment and source apportionment of heavy metals in typical rivers of Taihu basin [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2016. [王漫漫. 太湖流域典型河流重金属风险评估及来源解析 [学位论文]. 南京: 南京大学, 2016.]
- [22] State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China ed. Water quality Determination of total nitrogen Basic potassium persulfate ultraviolet spectrophotometric method. GB/T 11894-1989. [国家环境保护局. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾紫外分光光度法. GB/T 11894—1989.]
- [23] Ji YZ, Bai J, Li JH et al. Highly selective transformation of ammonia nitrogen to N<sub>2</sub> based on a novel solar-driven photoelectrocatalytic-chlorine radical reactions system. *Water Research*, 2017, 125: 512-519. DOI: 10.1016/j.watres.2017.08.053.
- [24] Sun C, You XP, Ao G. A brief discussion on the determination method and application of TN in water. *Inner Mongolia Water Resources*, 2017, (8) : 56-56, 58. [孙辰, 尤小平, 敖光. 浅谈水中总氮的测定方法及应用. 内蒙古水利, 2017, (8) : 56-56, 58.]
- [25] State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. Water quality Determination of total phosphorus Molybdenum-antimony anti-spectrophotometric method. GB/T 11893-1989. [国家环境保护局. 水质 总磷的测定 钼锑抗分光光度法. GB/T 11893—1989.]
- [26] Yan YQ. Analysis of influencing factors for the determination of TP in water by Molybdenum-antimony anti-spectrophotometry. *Journal of Green Science and Technology*, 2017, (2) : 32-33, 38. [严一乾. 钼锑抗分光光度法测定水中总磷的影响因素分析. 绿色科技, 2017, (2) : 32-33, 38.]
- [27] State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China ed. Water quality Determination of ammonia nitrogen NaCl reagent spectrophotometric method. HJ 535-2009. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. [国家环境保护局. 中华人民共和国国家标准: 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法. HJ 535—2009. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.]
- [28] State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China: Water quality; Determination of nitrate; Spectrophotometric method with phenol disulfonic acid. GB 7480-1987. [国家环境保护局. 中华人民共和国国家标准: 水质 硝酸盐氮的测定 酚二磺酸分光光度法. GB 7480—1987.]
- [29] Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China eds. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [30] Ren J, Wang G eds. Assessment and analysis of urban drinking water quality: A case study of Lanzhou City drinking water. Beijing: China Environmental Science Press, 2008. [任珺, 王刚. 城市饮用水水质评价与分析: 以兰州市城市饮用水水为例. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.]
- [31] Tang YL. Study on impact of water diversion and drainage on water quality of Liangxi river [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2018. [唐一率. 梁溪河水质改善的调水引流效应研究 [学位论文]. 南京: 南京大学, 2018.]
- [32] Li YP, Pang Y, Xiang J. Analysis to the characteristics of temporal and spatial distribution of the pollutant and the law of release from sediment in Taihu Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(3) : 300-306. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2005.03.004. [李一平, 逢勇, 向军. 太湖水质时空分布特征及内源释放规律研究. 环境科学学报, 2005, 25(3) : 300-306.]

- [33] Zhang XL, Zou R, Wang YL *et al.* Is water age a reliable indicator for evaluating water quality effectiveness of water diversion projects in eutrophic lakes? *Journal of Hydrology*, 2016, **542**: 281-291. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.09.002.
- [34] Lucas LV, Thompson JK, Brown LR. Why are diverse relationships observed between phytoplankton biomass and transport time? *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(1): 381-390. DOI: 10.4319/lo.2009.54.1.0381.
- [35] Cui GB, Chen X, Xiang L *et al.* Evaluation of water environment improvement by interconnected river network in plain area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(12): 1429-1437. [崔广柏, 陈星, 向龙等. 平原河网区水系连通改善水环境效果评估. 水利学报, 2017, **48**(12): 1429-1437.]
- [36] Hu H, Dong ZC, Li ZJ *et al.* Practice and consideration of water system connectivity in pingyuan district. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (1): 41-44. [胡昊, 董增川, 李梓嘉等. 平原区水系连通实践与思考. 中国农村水利水电, 2013, (1): 41-44.]
- [37] Gao Q, Tang QH, Meng QQ. Effect evaluation upon water environment improvement by river system network connecting construction in tidal river area. *Yangtze River*, 2015, **46**(15): 38-40, 50. [高强, 唐清华, 孟庆强. 感潮河湖水系连通水环境改善效果评价. 人民长江, 2015, **46**(15): 38-40, 50.]